

スラブ軌道てん充層の側面劣化に対する 補修目安値の提案

高橋 貴蔵* 桃谷 尚嗣* 谷川 光*
 藪中 嘉彦* 渕上 翔太*

Suggestion of Maintenance Level for Deterioration of Cement Asphalt Mortar of Slab-Track

Takatada TAKAHASHI Yoshitsugu MOMOYA Hikaru TANIGAWA
 Yoshihiko YABUNAKA Shota FUCHIGAMI

Frost damage occurs in the cement asphalt mortar (hereinafter referred to as the CA mortar) for slab-track laid in some sections of the Shinkansen. A repair of CA mortars is performed when the depth of deterioration has reached a criterion value. This criterion value has been decided so that a stress generated in the track-slab should be smaller than the permissible stress. On the other hand, a stress generated in the CA mortar will increase by the expansion of the deterioration range. Therefore the dynamic displacement of the track-slab may increase by progress of a plastic deformation. Therefore, in order to establish a criterion value intended for the slab-track of various shapes, it is necessary to examine the significant factor of the track-slabs and the CA mortar. So, we investigated for a cracking strength of the track-slab and compressive fatigue strength of the CA mortar, and based on the investigation results, we proposed a new criterion value for CA mortar.

キーワード：スラブ軌道，てん充層，CA モルタル，側面劣化，疲労寿命，補修目安値

1. はじめに

スラブ軌道は、てん充層に用いられるセメントアスファルトモルタル（以下、「CA モルタル」と称す）の耐凍害性の改善等を実施することで、東北新幹線および上越新幹線以降、寒冷地にも適用されてきた。しかし、寒冷地用として開発した初期の CA モルタルが用いられている一部の区間において凍害によるものと考えられる劣化が生じている¹⁾。

現在は CA モルタルの劣化によって軌道スラブの支持面積が変化した場合に生じる軌道スラブの応力度が許容応力度より小さいことを確認する許容応力度設計法により定めた表 1 に示す目安値等に基づいて、補修の要否を判断している²⁾。この目安値は従来の形状の軌道スラブ

を対象として定められたものであり、北陸新幹線（高崎 - 長野）以降から採用されている従来よりも幅が狭い平板軌道スラブや枠形軌道スラブでも同じ値が用いられている。しかしながら、実際には軌道スラブの形状が異なると発生応力も異なるため、形状に適した目安値が必要である。2011 年 12 月に鉄道構造物等設計標準・同解説軌道構造³⁾（以下、「軌道標準」と称す）が通達されたことから、今後は性能照査型設計法に基づいた軌道スラブの耐力に対する検討を行う必要がある。この場合、耐力にのみ着目すると、CA モルタルの目安値が緩和される可能性がある。一方で、CA モルタルの劣化を模擬したスラブ軌道供試体に対する繰返し載荷試験の結果から、劣化幅が拡大することによって外周部の CA モルタルの塑性変形が進行し、軌道スラブの動的な変位量が増加する可能性があることが確認されている⁴⁾。

そこで、CA モルタルの外周部から劣化が生じた際の影響について、軌道スラブの耐力と CA モルタルの塑性変形に対する検討を行い、これらの結果を踏まえた補修要否の判断の目安値を提案した。

2. 軌道スラブの検討

軌道スラブの検討に用いるスラブ軌道の種別を表 2 に示す。凍害による CA モルタルの劣化による欠損は、既

表 1 現行の補修要否の判断の目安値²⁾

| 損傷部 | ランク | 判定値 |
|-------|-----|-----------------------------------|
| 欠損 | A | $s \geq 10\text{cm}$ |
| | B | $10\text{cm} > s \geq 5\text{cm}$ |
| | C | $5\text{cm} > s \geq 2\text{cm}$ |
| 判定ランク | A | 速やかに補修する。 |
| | B | 計画的に補修する。 |
| | C | 注意する（台帳記入）。 |

※ s：劣化幅

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

特集：軌道技術

表2 スラブ軌道の種別

| 種類 | 形状 | 寸法 (m) | | | てん充層 | 片レール 当たりの 締結数 |
|------------|----|--------|------|------|------------------|---------------------|
| | | 幅 | 長さ | 厚さ | | |
| A-55C (8) | 平板 | 2.34 | 4.93 | 0.19 | CA モルタル | 8 |
| A-55C (7) | 平板 | 2.22 | 4.90 | 0.19 | CA モルタル | 7 |
| AF-55C (7) | 枠型 | 2.22 | 4.90 | 0.19 | CA モルタル | 7 |
| A-55CN (8) | 平板 | 2.34 | 4.93 | 0.19 | CA モルタル + マット | 8 |

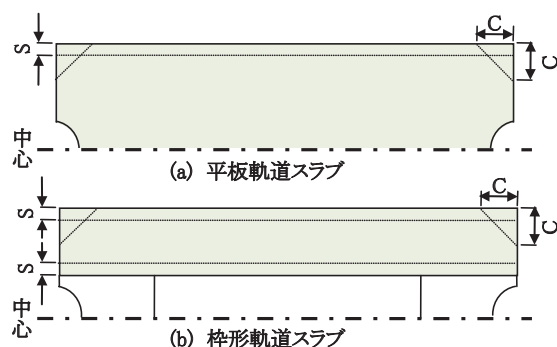


図1 CAモルタルの劣化範囲

表3 検討に用いるCAモルタルの欠損幅

| 軌道スラブ 種類 | CAモルタルの欠損幅 | |
|-------------|----------------------|-------------|
| | S (mm) | C (mm) |
| A-55C (8) | 0,50,100,150,200,235 | 0 |
| | 100 | 100,200,300 |
| A-55C (7) | 0,50,100,150,175 | 0 |
| | 100 | 100,200,300 |
| AF-55C (7) | 0,50,100,150,175 | 0 |
| | 100 | 100,200,300 |
| A-55CN (8) | 0,50,100,150,200,235 | 0 |
| | 100 | 100,200,300 |

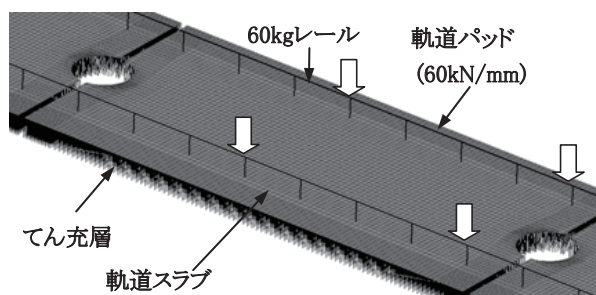


図2 軌道スラブの解析モデル

往の文献^{1) 5)}を参考とし、外周部から進行するものとした。CAモルタルの欠損は図1に示すS (Side) およびC (Corner) の位置に生じるものとし、欠損幅は表3に示す値とした。軌道スラブはてん充層で所定の範囲を支持するように設計されているが、CAモルタルの欠損が生じることによって、軌道スラブに設計以上の曲げモーメントが生じる可能性がある。凍害の影響を受ける寒冷地の明かり区間で用いられているプレストレスト鉄筋コンクリート構造の軌道スラブはひび割れが発生しないように維持管理する必要がある。そこで、常

表4 解析に用いた物性値

| | 材料特性 | 備考 |
|-------|--|----------------|
| 軌道スラブ | ヤング率：31 kN/mm ² | — |
| てん充層 | ばね定数：4.0 N/mm/mm ² ばね定数：0.4 N/mm/mm ² | 普通タイプ 防振タイプ |

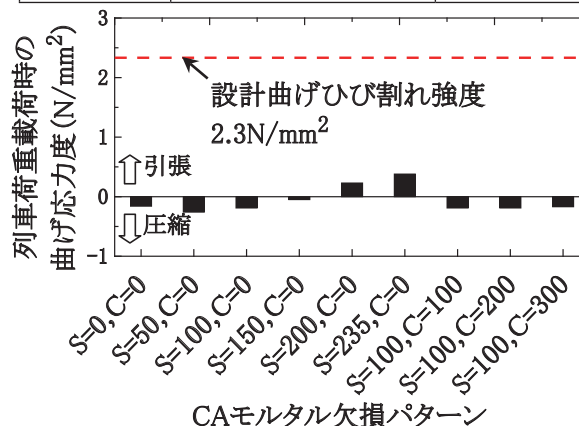


図3 A-55CN (8) の設計曲げ応力度

時の列車荷重 (輪重：静的輪重 85kN × 変動輪重係数 1.45=123.3kN) によって軌道スラブに生じる応力度がコンクリートの曲げひび割れ強度以下であるか軌道標準に基づいて照査することで検討することとした。

軌道スラブの応力度は図2に示す解析モデルを用いた有限要素解析で算出した。材料特性は表4に示す通り、設計で用いる値と同じである。ただし、表3に示したA-55CN (8) は防振スラブ軌道に用いる軌道スラブであり、CAモルタルとスラブマットからなるてん充層の単位面積当たりのばね定数は、0.4N/mm/mm²とした⁶⁾。

解析の結果、軌道スラブに生じる設計曲げ応力度が最も大きくなったのはA-55CN (8) であった。そこで、一例としてA-55CN (8) の設計曲げ応力度をコンクリートの設計曲げひび割れ強度 2.3N/mm² とともに図3に示す。なお、設計曲げ応力度にはPC鋼棒によるプレストレスによってコンクリートに生じる圧縮応力度も考慮している。図3より、表3に示した欠損幅の範囲内において、軌道スラブに生じる設計曲げ応力度は設計曲げひび割れ強度よりも小さく、耐力の問題がないことを確認した。なお、他の種類の軌道スラブも同様な結果となった。

3. CAモルタルの検討

凍害によりCAモルタルの外周部が大きく欠損し、軌道スラブの支持面積が小さくなった場合、CAモルタルの外周部に生じる圧縮応力度が大きくなる可能性がある。このような状態で列車荷重が繰り返された場合、CAモルタルに塑性変形が生じ、軌道スラブの支持状態がさらに悪化する可能性がある。そこで、有限要素解析によってCAモルタルの圧縮応力度を算定し、円柱供試体に対する一軸圧縮繰返し載荷試験によって求めたCA

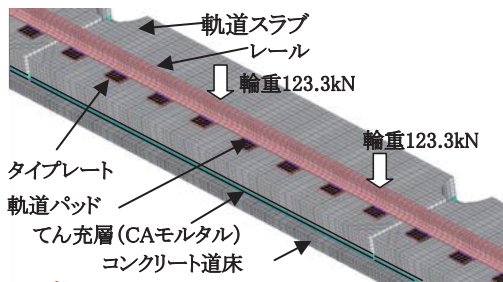


図4 解析モデルの例

表5 材料特性

| 軌道部材 | ヤング率 (N/mm ²) | ポアソン比 | 摩擦係数 |
|----------|---------------------------|-------|----------------|
| 軌道スラブ | 31000 | 0.17 | 下面 0.3 |
| コンクリート道床 | 26400 | 0.17 | 上面 0.5 |
| タイプレート | 200000 | 0.3 | — |
| レール | 200000 | 0.3 | — |
| 軌道パッド | 23.81 | 0.35 | — |
| CAモルタル | 1200 | 0.35 | 上面 0.3, 下面 0.5 |

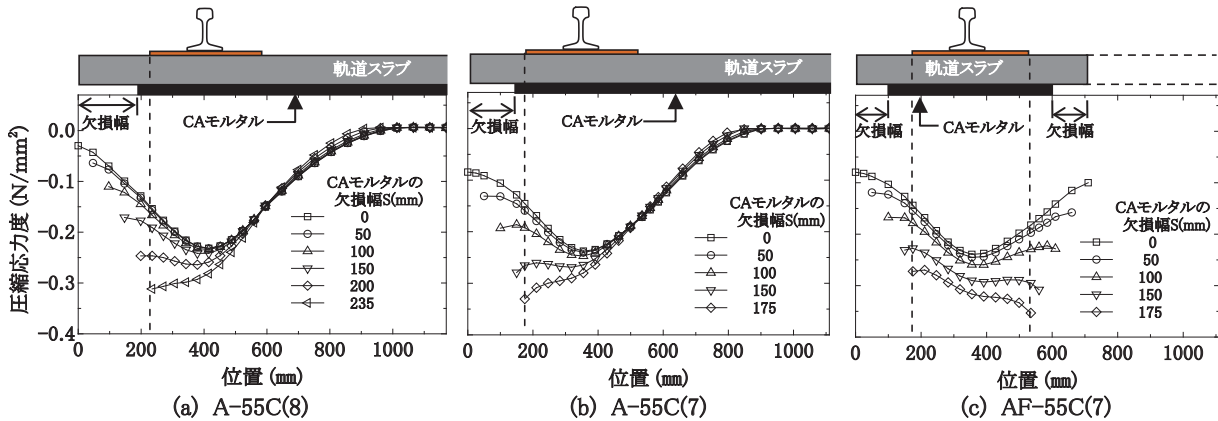


図5 CAモルタルの圧縮応力度分布

モルタルの塑性変形に基づく圧縮疲労強度と比較することで疲労寿命に対する検討を行うこととした。なお、防振スラブ軌道である A-55CN (8) については、スラブマットが変形することによって応力が分散され、CAモルタルに生じる応力度が小さくなるため、検討は省略した。

3.1 CAモルタルに生じる圧縮応力度

有限要素解析に用いるスラブ軌道の諸元およびCAモルタルの欠損幅は「2. 軌道スラブの検討」と同じである。解析に用いた解析モデルの例を図4に示し、解析に用いた材料特性を表5に示す。解析では軌道スラブの疲労破壊に関する安全性の照査に用いる輪重（静的輪重 85kN × 変動輪重係数 1.45=123.3kN）を作用させた³⁾。

図1の欠損幅 C を 0mm とした場合における軌道スラブ端部に近い輪重直下の締結位置の断面に生じるCAモルタルの圧縮応力度分布を図5に示す。欠損幅 S が 100mm 程度まではレール直下に生じる圧縮応力度はほぼ一定であり、側面に生じる値よりも大きいことがわかった。また、欠損幅 S が 150mm 程度よりも大きくなると、A-55C (7) および AF-55C (7) においてレール直下よりも外周部の圧縮応力度の方が大きくなることわかった。

つぎに、隅角部に欠損幅 C を考慮した結果に着目すると、図6に示すように隅角部の外周部に生じる圧縮応力度の値が大きくなることわかった。そこで、図7に示すようにCAモルタルの外周部に生じる圧縮応力度の最大値を軌道スラブ種別ごとに整理した。図7より、隅角部の欠損幅 C が 200mm までは、圧縮応力度の最大値

はほぼ一定だが、300mm まで欠損すると最大値は増加し、隅角部の欠損幅 C が 100mm の場合に比べて約 1.1 ~ 1.4 倍になることがわかった。

なお、CAモルタルはコンクリートに比べると感温性が高い材料であり、温度の変化によって強度やヤング率といった材料特性が変化する。そこで、CAモルタルの温度が 0℃、20℃および 40℃ の場合のヤング率 (1000 ~ 1400N/mm²) でCAモルタルに欠損が生じていない状態の A-55C(8) に対する解析を行った結果、温度によるCAモルタルのヤング率の違いは圧縮応力度にほぼ影響しないことを確認した。

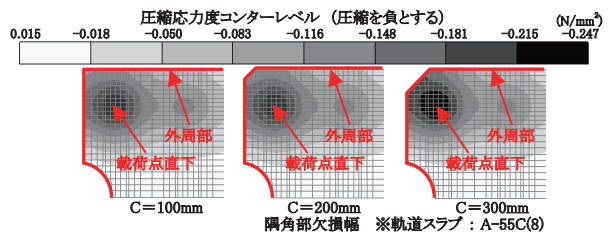


図6 CAモルタルの圧縮応力度コンターの例

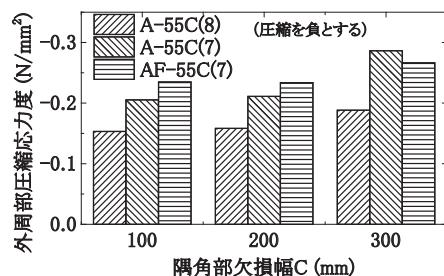


図7 CAモルタル外周部の圧縮応力度の最大値

特集：軌道技術

3.2 CAモルタルの圧縮疲労試験⁷⁾

CAモルタルのS-N曲線を検討するため、材齢28日におけるφ50×100mmの円柱供試体に対する一軸圧縮疲労試験を実施した。試験に使用したCAモルタルは東北新幹線大宮-盛岡間および上越新幹線大宮-新潟間の明かり区間に敷設されているスラブ軌道に使用されているものと同じである。繰返し応力度の下限値は圧縮疲労試験の直前に別途実施して得られた圧縮強度に対して5%の一定とし、上限値は圧縮強度に対する比率（以下、「圧縮強度比」と称す）として表6に示す値を用いた。なお、圧縮疲労試験は、CAモルタルの感温性を考慮し、0℃、20℃および40℃で湿度60±5%の恒温恒湿室で実施した。載荷周波数は20Hzとし、荷重制御の正弦波で載荷した。繰返し回数は最大500万回とし、疲労破壊した時点で試験を終了した。また、500万回まで達した場合は、荷重を除荷して24時間の遅れ弾性ひずみを測定した。

0℃、20℃および40℃における一軸圧縮疲労試験から得られた繰返し回数と最大荷重時のひずみの関係を図8に示す。圧縮強度比が15～55%で繰返し載荷した場合、ひずみは繰返し回数100万回までの間に急激に増加し、その後線形的に増加した。繰返し回数100万回以降における線形回帰直線の傾きをひずみ勾配と定義して図9に示し、線形回帰直線の繰返し回数0回における切片を初期ひずみと定義して図10に示す。

表6 一軸圧縮疲労試験条件

| 雰囲気温度 | 繰返し応力度の上限値 (圧縮強度比) |
|----------|-----------------------|
| 0,20,40℃ | 15,35,55,75% |

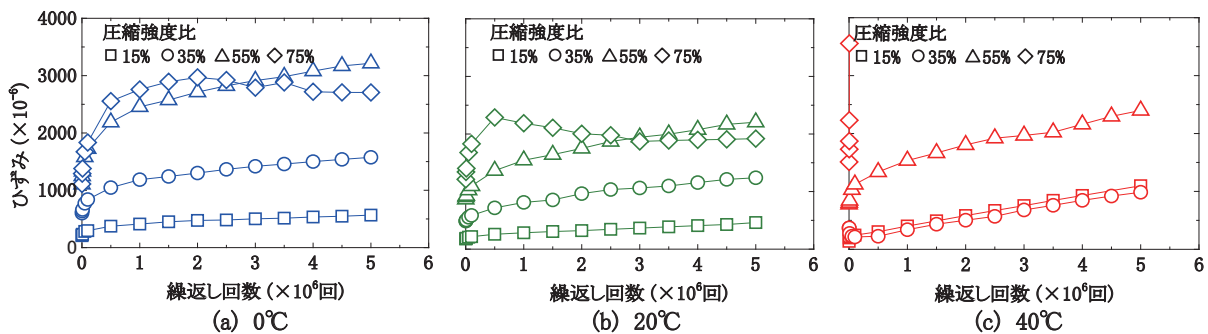


図8 繰返し回数 - ひずみ関係

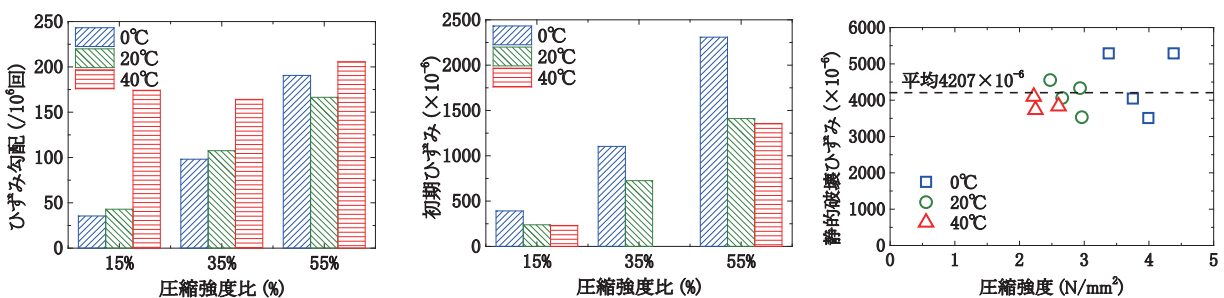


図9 圧縮強度比 - ひずみ勾配関係 図10 圧縮強度比 - 初期ひずみ関係 図11 圧縮強度 - 静的破壊ひずみ関係

図9より、各温度において、ひずみ勾配は圧縮強度比の増加に伴い大きくなる傾向にあった。ただし、40℃では繰返し荷重が最も小さい条件でもひずみ勾配が大きく、載荷一回当たりの疲労度が大きいことがわかった。

図10より、各温度において、初期ひずみは繰返し荷重の増加に伴い大きくなる傾向にあり、繰返し荷重と概ね比例関係にあることがわかった。また、初期ひずみを同一荷重条件で比較すると20℃と40℃の値は概ね等しいものの、0℃の値はこれらの1.5～1.6倍になることを確認した。ここで、40℃の条件で圧縮強度比を35%としたケースについて、繰返し回数50万回までひずみが低下したため、図10には示していない。試験装置の不具合により、荷重が小さくなったことが原因として考えられる。

図8を見ると、圧縮強度比75%で繰返し載荷した場合、0℃では200万回以降、20℃では50万回以降でひずみが低下した。また、40℃では0.5万回以降でひずみが急激に進展した。ひずみが低下あるいは急激に進展したのは、繰返し載荷によってせん断面にひずみが集中したためと考えられ、ひずみゲージの測定位置がせん断面の近傍の場合、ひずみが増加し、せん断面から離れている場合、ひずみが低下したものと考えられる。ひずみの進展の変化は、2000～3000×10⁻⁶程度で生じており、この際の繰返し回数を圧縮疲労寿命と定義した。一軸圧縮疲労試験前に実施した静的圧縮試験で得られた最大荷重時のひずみ（以下、「静的破壊ひずみ」と称す）は図11に示す通り3500×10⁻⁶～5500×10⁻⁶の範囲であり、圧縮強度に対する相関が小さく、平均値は4207×10⁻⁶であった。以上より、本試験条件において、一軸圧縮疲労試験による

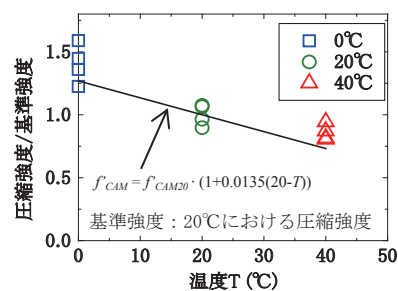
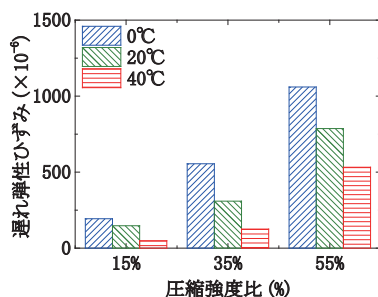
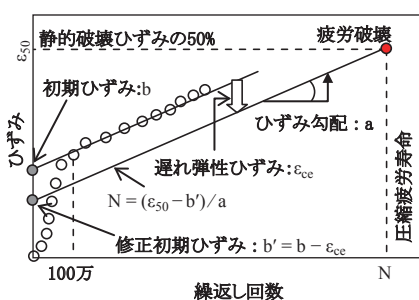


図 12 圧縮疲労寿命の算定方法関係 図 13 圧縮強度比 - 遅れ弾性ひずみ関係 図 14 圧縮強度 / 基準強度 - 温度関係

最大荷重時のひずみが静的破壊ひずみの平均値に対して約 50～70%となると疲労寿命に達するものと考えられる。

3.3 CA モルタルの S-N 曲線

ここでは CA モルタルの圧縮疲労破壊は静的破壊ひずみの 50% に達すると生じるものと定義し、繰返し回数 100 万回以降の線形回帰直線を用いて寿命を推定することとした。圧縮疲労寿命の推定に関する概念を図 12 に示す。なお、静的破壊ひずみは、図 11 に示した結果を考慮し、圧縮強度にかかわらず、平均的な値として 4000×10^{-6} とした。

スラブ軌道の CA モルタル外周部の疲労寿命を算定する場合、季節変動による温度変化の影響を考慮する必要がある。そこで、想定する温度に対する圧縮疲労寿命の推定に用いる線形回帰直線のひずみ勾配と初期ひずみは、図 9 と図 10 に対して線形補間により定めるものとした。ただし、実際のスラブ軌道では、圧縮疲労試験のように持続的な繰返し荷重を受けないことから、クリープひずみの影響を最小化する必要がある。そのため、圧縮疲労寿命を推定する場合は、図 10 に示す線形回帰直線の初期ひずみから図 13 に示す圧縮疲労試験終了 24 時間後の遅れ弾性ひずみを差し引いた修正初期ひずみを用いるものとした。なお、除荷後 24 時間での遅れ弾性ひずみは一定値に漸近していることを確認している。

また、CA モルタルの圧縮強度は温度によって変化することから、疲労寿命を推定する際に用いる圧縮強度についても温度の影響を考慮する必要がある。そこで、一軸圧縮疲労試験前に実施した静的圧縮試験によって得られた圧縮強度の結果から、図 14 に示すように 20°C における圧縮強度を基準強度とする式 (1) に示す算定式を用いて圧縮強度を算定した。

$$f_{CAM} = f_{CAM20} \cdot (1 + 0.0135(20 - T)) \quad (1)$$

ここに、 f_{CAM} : 圧縮強度 (N/mm²)

f_{CAM20} : 20°C における圧縮強度 (N/mm²)

T : CA モルタルの温度 (°C)

上述した方法で推定した基準強度を 2.5N/mm² とした場合の 0～40°C における圧縮疲労寿命を図 15 に示す。なお、ここで示した疲労寿命は外周部を対象としており、

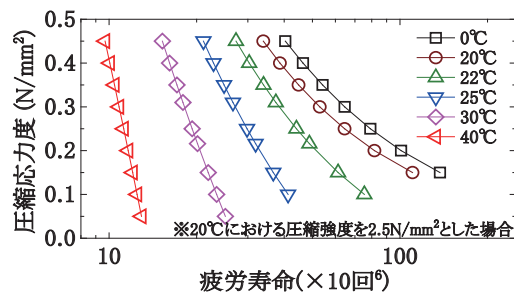


図 15 CA モルタルの圧縮疲労寿命の例

レール直下では CA モルタルは 3 軸拘束下にあることから、外周部より圧縮疲労寿命は長いと考えられる。

3.4 CA モルタル外周部の疲労寿命

「3.1 CA モルタルに生じる圧縮応力度」に示した解析モデルに対して列車荷重によって軌道スラブを支持する CA モルタル外周部に生じる圧縮応力度を算出し、この値を用いて「3.3 CA モルタルの S-N 曲線」に示した CA モルタル外周部の S-N 曲線から算定した圧縮疲労寿命に達する年数を表 7～表 9 に示す。ここで、圧縮疲労寿命の算定には実際の列車荷重および圧縮強度に近い値を用いる必要がある。そのため、列車荷重は 100% 乗車時を対象とした輪重 64kN に変動輪重係数 1.45 を乗じた荷重を用い、CA モルタルの基準強度は 20°C の条件で実施した静的圧縮試験で得られた圧縮強度の中で最も小さな 2.5N/mm² とした。繰返し回数は新幹線の編成を 16 両とし、1 日当たりの列車本数は、軌道スラブが敷設されている区間を考慮して A-55C (8) に対して 75 本、A-55C (7) および AF-55C (7) に対して 50 本と仮定して算出した。

疲労寿命の算出に当たっては冬季 (1～3 月)、春季 (4～6 月)、夏季 (7～9 月) および秋季 (10～12 月) の平均温度を、前述のように敷設されている区間を考慮してそれぞれ -1.4°C、14.0°C、24.1°C および 6.5°C とし、各季節における被害度を個々に算出し、それぞれを足し合わせた値が 1.0 となった場合に疲労破壊が生じるとする線形被害則を取り入れている。なお、-1.4°C におけるひずみ勾配、修正初期ひずみおよび圧縮強度は外挿により求めた。

CA モルタルの外周部に生じる圧縮応力度は、「3.1 CA モルタルに生じる圧縮応力度」で触れたように 0～

特集：軌道技術

表7 A-55C (8)を支持するCAモルタル外周部の疲労寿命

| | | 隅角部欠損幅 C (mm) | | | |
|--------------|-----|---------------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 100 | 200 | 300 |
| 側面欠損幅 S (mm) | 0 | 57.4年 | - | - | - |
| | 50 | 57.3年 | - | - | - |
| | 100 | 56.7年 | 56.7年 | 55.6年 | 49.5年 |
| | 150 | 52.8年 | - | - | - |
| | 200 | 40.5年 | - | - | - |
| | 235 | 33.6年 | - | - | - |

表8 A-55C (7)を支持するCAモルタル外周部の疲労寿命

| | | 隅角部欠損幅 C (mm) | | | |
|--------------|-----|---------------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 100 | 200 | 300 |
| 側面欠損幅 S (mm) | 0 | 79.8年 | - | - | - |
| | 50 | 79.3年 | - | - | - |
| | 100 | 70.5年 | 70.5年 | 69.1年 | 54.6年 |
| | 150 | 53.7年 | - | - | - |
| | | 175 | 47.5年 | - | - |

表9 AF-55C (7)を支持するCAモルタル外周部の疲労寿命

| | | 隅角部欠損幅 C (mm) | | | |
|--------------|-----|---------------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 100 | 200 | 300 |
| 側面欠損幅 S (mm) | 0 | 78.5年 | - | - | - |
| | 50 | 76.5年 | - | - | - |
| | 100 | 63.8年 | 63.8年 | 64.1年 | 57.9年 |
| | 150 | 49.9年 | - | - | - |
| | | 175 | 44.2年 | - | - |

40℃の範囲において温度の影響が小さいため、各季節における圧縮応力度は、温度の影響を省略してCAモルタルのヤング率を1200N/mm²として算出した値を用いた。

表7～表9より、側面の欠損がタイプレートの位置（各ケースにおける側面欠損幅の最大値）まで達すると、圧縮疲労寿命に達する年数は35～45年程度になった。また、側面のみが100mm欠損した場合よりも、側面100mmと隅角部300mmの両方が欠損した場合の方が寿命に達する年数が5～10年程度短くなることがわかった。

4. 補修要否の判定の目安値の提案

寒冷地において、てん充層に使用されているCAモルタルの外周部に対する補修要否の判定に用いる目安値を以下の3点を考慮して表10に提案する。

- ① スラブ軌道模型に対する繰返し載荷試験において欠損幅が100mmの場合、繰返し載荷に伴う変位の進展が確認されていないこと⁴⁾。
- ② 圧縮疲労寿命に達する年数が50年を下回らないこと。
- ③ 外側と内側から欠損が生じる枠形軌道スラブを支持するCAモルタルに対して管理値を厳しくすること。

なお、枠形軌道スラブを支持するCAモルタルの内側に対して凍害を防止する適切な対策が行われた場合は、外側よりも凍害の進行が遅くなると考えられることから、外側を検査することによって内側も検査したこととしてよいと考えられる。

表10 提案する補修要否の判定の目安値

| 項目 | 区間 | 不良判定ランク |
|------------------|--------------------------|---|
| 欠損 | 平板軌道 スラブ区間 | Aランク：s ≥ 150mm Bランク：150mm > s ≥ 100mm Cランク：100mm > s ≥ 50mm |
| | 枠形軌道 スラブ区間 (内側も同様) | Aランク：s ≥ 100mm Bランク：100mm > s ≥ 75mm Cランク：75mm > s ≥ 50mm |
| 不良判定 ランクの適用方法 | | Aランク：速やかに補修する。 Bランク：計画的に補修する。 Cランク：注意する。台帳へ記入する。 |

※s：欠損幅

5. まとめ

本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 本研究で検討した範囲において、CAモルタルの外周部から欠損が生じてもプレストレスト鉄筋コンクリート構造の軌道スラブは十分な耐力を有していることを確認した。
- (2) 有限要素解析から得られた圧縮応力度と圧縮疲労試験から得られたS-N曲線を用いて、季節の変化に伴う温度の影響を考慮したスラブ軌道てん充層に用いられているCAモルタル外周部に対する疲労寿命の推定方法を提案した。
- (3) 軌道スラブの耐力とCAモルタル外周部の疲労寿命を考慮したCAモルタルに対する補修要否の判定に用いる目安値を提案した。

文 献

- 1) 佐藤靖紀, 原口征人, 赤川敏: スラブ軌道におけるCAモルタルの経年劣化, 土木学会年次学術講演会, No.4, Vol.56, pp.548-549, 2001.9
- 2) 鉄道総合技術研究所: スラブ軌道各部補修の手引, 鉄道総合技術研究所, p.55, 2002.2
- 3) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善, 2012.1
- 4) 高橋貴蔵, 洲上翔太, 桃谷尚嗣, 藪中嘉彦: スラブ軌道てん充層の補修効果に関する研究, 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム, s2-3-6, 2014.12
- 5) 長沼光, 高橋貴蔵, 藪中嘉彦, 桃谷尚嗣: 寒冷地のスラブ軌道用てん充層の劣化深さに関する検討, 土木学会第68回年次学術講演概要集, pp.567-568, 2013.9
- 6) 日本国有鉄道著: 東北新幹線工事誌大宮・盛岡間, p.268, 1983.1
- 7) 高橋貴蔵, 長沼光, 桃谷尚嗣, 藪中嘉彦: セメントアスファルトモルタルの圧縮疲労強度, 土木学会第68回年次学術講演概要集, pp.269-270, 2013